

**Rostislav ZÍDEK<sup>1</sup>, Luděk BRDEČKO<sup>2</sup>**

**TRADIČNÍ KROV – HAVARIJNÍ STAV, MODELOVÁNÍ A PŘÍČINY**

**TIMBER TRUSS – CRITICAL CONDITION, MODELING AND CAUSES**

**Abstrakt**

V příspěvku je prezentováno modelování postupné degradace krovu zemědělského objektu. Autoři si nekladou za cíl pouze informovat o příčinách poruchy jedné konkrétní konstrukce, ale nabízí některé obecnější zásady pro vytváření výpočtových modelů tohoto typu konstrukcí a pro pochopení jejich statického působení.

**Klíčová slova**

Dřevěný krov, výpočtový model, spoje, porucha.

**Abstract**

The paper presents the modeling of progressive failure of a farm building timber truss. Authors do not aim only to inform about causes of the failure of one specific structure, but they also offer some general principles for development of computational models of this type of structures and for understanding their static behavior.

**Keywords**

Timber truss, computational model, joints, failure.

## **1 ÚVOD**

Je málo tak rozšířených konstrukcí jako jsou tradiční krovy. Jsou to konstrukce minulosti, ale i současnosti. Jejich obrovské rozšíření odpovídá dostupnosti základního materiálu, snadnosti opracování a celkové laci. Postupným empirickým vývojem se dospělo k souboru tesařských spojů a k několika základním typům funkčních nosných systémů s množstvím variant, lišících se regionálně, dobově i podle konkrétních tesařských mistrů. Ještě v relativně nedávné době se dřevěné krovy navrhovaly empiricky, bez statického výpočtu, a tato praxe byla obecně akceptována. Toto je možná jeden z důvodů proč stávající konstrukce dřevěných krovů mnohdy vykazují poruchy, které jsou způsobeny přešlapy a chybami v návrhu a provedení konstrukce. Tyto chyby, pokud nejsou fatální, se projevují po dlouhá desetiletí především nadměrnými a stále se zvětšujícími deformacemi, které mohou postupně ztěžovat až znemožňovat užívání konstrukce. Havárie krovů jsou však poměrně vzácné a projevují se obvykle ve výjimečných zimách, u nás především zima na přelomu let 2005 a 2006. Autoři příspěvku ve své praxi navrhovali nové dřevěné krovy i posuzovali či navrhovali adaptace stávajících konstrukcí. V tomto příspěvku jsou na jedné konkrétní konstrukci popsány obecněji platné poznatky o mechanismech poruch a příčinách postupné degradace konstrukce, které postupně znemožnily užívání stavby a jejichž následkem je havarijní stav a plánovaná demolice.

---

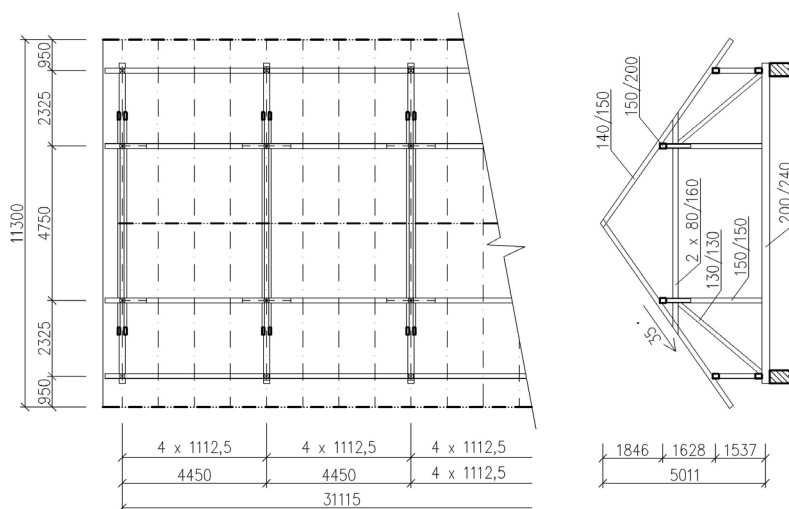
<sup>1</sup> Ing. Rostislav Zídek, Ph.D., Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno, tel.: (+420) 541 147 368, zidek.r@fce.vutbr.cz.

<sup>2</sup> Ing. Luděk Brdečko, Ph.D., Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno, tel.: (+420) 541 147 368, zidek.r@fce.vutbr.cz.

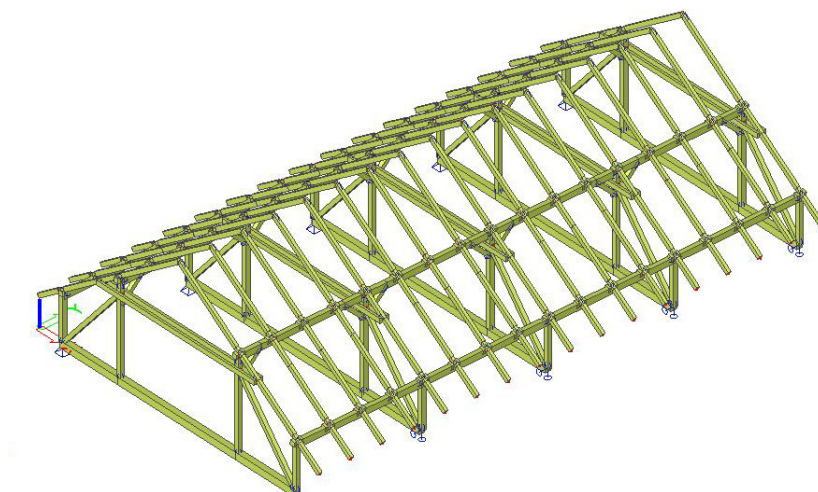
Stavba je umístěna v centrální části Českomoravské vrchoviny a představuje typickou regionální konstrukci zemědělské budovy z 1. poloviny 20. století.

## 2 KONSTRUKCE A MODEL

Popisovaná zemědělská hala (obr. 3) byla postavena na konci dvacátých let 20. století a byla používána ještě ve zcela nedávné době. Základní uspořádání konstrukce ukazuje obrázek 1. Stavba sestává z podpůrných zdí a krovu, jehož hlavní nosnou částí jsou plné vazby stojaté stolice (dvojitě věšadlo), které podpírají vaznice a krokve. Krytina je skládaná, tašková. Na části stavby je mezipatro, které sloužilo ke skladování sena a slámy.



Obr. 1: Základní uspořádání konstrukce



Obr. 2: Výpočtový model

Pro analýzu konstrukce byl vytvořen prostorový prutový model (obr. 2). Při jeho tvorbě se částečně vycházelo z modelů krovů obsažených v knihách [3] a [4]. Při vlastním modelování byla uvážena specifika, která plynou především z technologie výstavby a statického působení tradičních dřevěných konstrukcí:

- Dva dřevěné prvky nelze klasickými prostředky spojit monoliticky. Výsledkem je vždy kloub. Bezmyšlenkovitá implementace kloubů do modelu však může vést k mechanismu a tím k singulární soustavě rovnic. Je tedy třeba uplatňovat klouby na základě skutečné funkce prvků a spojů v konstrukci, protože některá kloubová připojení se ve skutečnosti neuplatní. V případě předkládaného modelu se jedná o kloub mezi pozednicí (krajní vaznicí) a sloupkem. Převládající tlakové namáhání a čepový spoj zabráňují otevření spáry mezi sloupkem a pozednicí. Kromě toho, modelováním tohoto kloubu a zároveň kloubu mezi vazným trámem a sloupkem bychom dosáhli mechanismu.
- Modelování oslabení prvků zářezy. Velká část tradičních tesařských spojů se vytváří vzájemným zapuštěním, což s sebou nese oslabení průřezu. V některých případech je možno ho ignorovat, někdy musí být zohledněno. Typickým příkladem je osedlání krokve, jak je popsáno v kapitole 2 a 3.3.
- Neschopnost některých typů tesařských spojů přenášet tahová napětí. Tato skutečnost může vést v případě některých kombinací zatížení k úplnému vyřazení taženého prvku z funkce.
- Změna průřezů dřevěných prvků. Tradiční výroba dřevěných trámů neprobíhala řezáním, ale otesáváním boků klády. Pracnost této technologie se zvyšuje s množstvím hmoty, která musí být tesáním odstraněna. Typický tesaný trám má tedy oblíny a velmi často průřez blízký čtverci, který se zmenšuje podle stromu, ze kterého byla kláda vyrobena. Průřez, který vstupuje do výpočtu, by měl být naměřený nejlépe z místa očekávaného extrémního namáhání.
- Únosnost spojů. Z důvodu empirického návrhu konstrukcí bývají některé spoje výrazně poddimenzované a během používání konstrukce mohou ztratit svoji funkci. V případě krovu stodoly se jedná typicky o spoj kleštiny a krokve, jak o něm bude pojednáno níže. Na druhou stranu, kvalita provedení tesařských spojů bývá na vysoké úrovni dané pečlivou výrobou pomocí ručních nástrojů – dlát a pil s jemnými zuby. Mezi přesně opracovanými plochami je zaručen dobrý přenos sil. V současnosti běžně používané řetězové pily vedou ke ztlačně menší přesnosti z důvodu mnohem obtížnějšího vedení řezu.

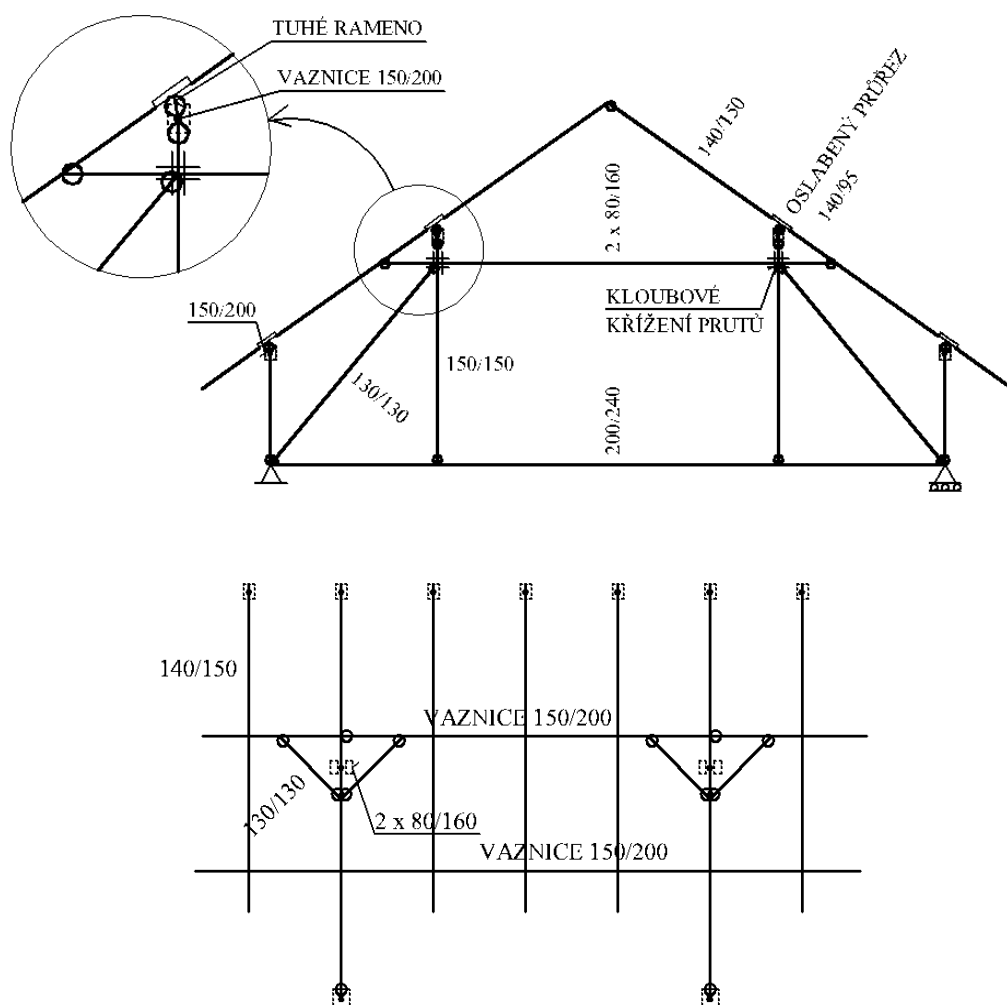
Konkrétní uspořádání modelu objasňuje obrázek 4. Stropní konstrukce, působící nezávisle na krovu, modelována nebyla.



Obr. 3: Současný stav budovy

Konstrukce byla modelována a posuzována podle platné normy [1], která vychází z normy DIN 1052 a je variací platného Eurokódu 5 [2]. Dřevo bylo uvažováno třídy C22 s výpočtovou pevností v ohybu 15,23 MPa, charakteristická mez kluzu oceli v posudcích spojů se uvažovala hodnotou 360 MPa. Cílem práce nebylo posouzení únosnosti ve smyslu normy [1], ale nalezení mechanismu porušení a způsobu sanace.

Během práce bylo vytvořeno několik výpočtových modelů na různé úrovni zjednodušení, zde je prezentován nejvýstižnější. Vycházelo se z geometrie nepoškozené konstrukce; modelování vycházející z deformované konstrukce vedlo pouze k nepodstatným změnám v deformacích i ve vnitřních silách.



Obr. 4: Výpočtový model – příčný a podélný řez

### 3 STATICKÉ PŮSOBNÍ KONSTRUKCE

#### 3.1 Původní konstrukce

Předpokládejme, že v původní konstrukci byly všechny spoje funkční. I za tohoto předpokladu jsou na řadě míst překročena mezní napětí a konstrukce tedy formálně nevyhoví. Překročení návrhových napětí řádově o deset procent na vaznicích není nebezpečné. Na krokvích, v místech uložení na vaznice a tedy oslabení zářezem pro osedlání je dosahováno podstatně vyšších napětí (charakteristické 20,8 MPa; návrhové 30,1 MPa). Je ale zjevné, že toto namáhání nevedlo ke kolapsu (skutečná pevnost zdravého smrkového dřeva v tahu je až 60 MPa).

Větší problém nastane na styku kleštiny a krokve. Kleština má v této konstrukci dvojí statické působení. Mezi sloupky je to rozpěra dvojitého vřsadla, mezi sloupkem a krokví se jedná o kleštinu zachycující vodorovné síly, vyvolané zejména působením krokve, jak je objasněno v kapitole 3.3. Normálová síla v kleštině mezi sloupkem a krokví je v návrhové hodnotě 23,4 kN (odpovídající charakteristická hodnota je 16,1 kN). Přenos síly je zajištěn kolíkem a jednostranným rybinovým překlátováním. Schéma spoje je na obrázku 6. Skutečné chování takového typu spoje je poměrně komplikované, jak prokazuje analýza [5]. Pro účely této studie je dostačující určit únosnost jako součet únosnosti otláčovaného dřeva silami podle obrázku 6 a únosnosti kovového kolíku. Takto vypočtená únosnost spoje je cca 5 krát překročena (i po započtení únosnosti ocelového kolíku) a jak dokládá obrázek 5, spoje jsou porušené a nefunkční. Tím dochází ke změně statického systému.

Svislý posun hřebene střechy se pohybuje od 6 mm v místě plných vazeb po 35,2 mm uprostřed mezi plnými vazbami.

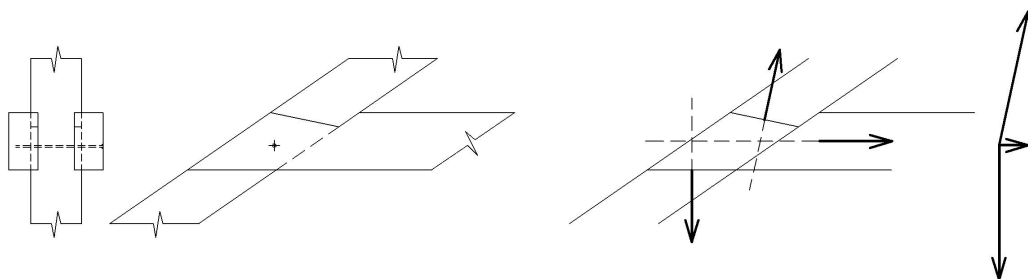


Obr. 5: Detail styku vaznice, sloupku, kleštiny a krokve

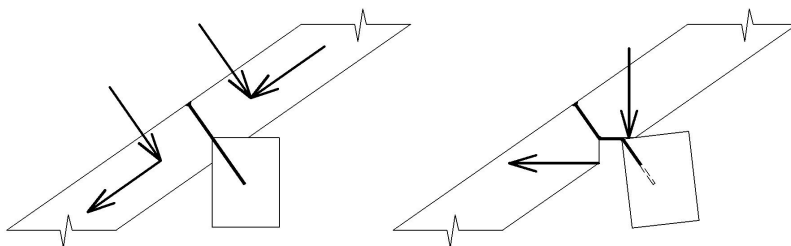
### 3.2 Změna statického systému

Ve druhém stádiu funguje konstrukce naprosto bez příčného ztužení, spoj mezi kleštinami a krokví je zcela vyřazen. Dochází k radikálnímu přerozdělení napětí. Stavebně mechanicky se krokve přibližují staticky určité konstrukci a klesá tak jejich další schopnost přerozdělení napětí. V této fázi dochází k natočení vaznic směrem ven o cca  $6,3^\circ$  až  $7^\circ$  a roste i svislý posun hřebene (až 70 mm). Napětí v sedlech krokví v místě spoje s vaznicí stoupl na 37,0 MPa v návrhové hodnotě, oproti 15,23 MPa návrhové pevnosti. Nejvýznamnějším problémem je spoj vaznice a krokve. Smykovou sílu přenáší hřebík šikmo zaražený přes krokvu do vaznice (obr. 7). Tento hřebík je namáhán kombinací smyku a vytažení. Uvažujeme-li jenom čistý smyk (což je jistě na stranu nebezpečnou), je jeho výpočtové namáhání 2,95 kN a únosnost 1,576 kN pro prům. 6 mm a 0,807 kN pro prům. 4 mm. Z mechanismu působení (obr. 7) je patrné, že tento hřebík je namáhán na vytažení a že skutečná únosnost bude nižší, než předpokládá výpočet na smyk. Z prohlídky konstrukce se nedá průměr hřebíků určit, a zdá se, že někde dokonce úplně chybějí (obr. 8). Je ale jasné, že v osedlání krokví došlo ke značnému posunu, které zvětšilo excentricitu působícího svislého zatížení a tímto mechanismem došlo k drastickému pootočení vaznic, které se blíží úplnému kolapsu (obr. 5).

Z fotografie (obr. 1) je jasné patrné, že vzdálenější část střechy je poškozená více než bližší. Dle vyjádření majitele to bylo způsobeno vzrostlým stromem, který rostl v těsné blízkosti objektu a který část střechy zatěžoval.



Obr. 6: Detail styku krokve a kleštin. Rybinový spoj - působící síly



Obr. 7: Detail styku krokve a vaznic. Osedlání - působící síly





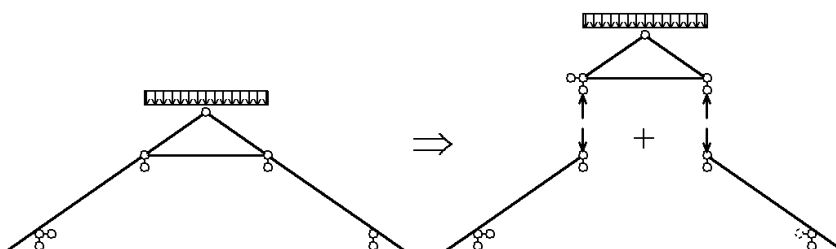
Obr. 8: Poškozený styk vaznice a krokve

### 3.3 Sanace

V době, kdy to ještě mělo význam, bylo možno konstrukci sanovat velmi jednoduchým způsobem, který plyne ze statického působení krokve. Zjednodušeně, nicméně výstižně, lze osedlání v krokvi modelovat kloubem, protože zářez do jedné třetiny výšky průřezu způsobí pokles ohybové tuhosti na méně než 30%. Potom se z horní části krokve stane trojkloubový rám. Nabízí se vytvořit trojkloubový rám s táhlem pomocí prkna připevněného svorníkem nebo hřebíky (obr. 9). Namáhání krokve, ale i vaznic bude rovněž mnohem příznivější, stejně jako namáhání spoje krokve s vaznicí. Spoj mezi krokví a kleštinou touto úpravou ztrácí význam a není třeba ho obnovovat.

Pro přenos zatížení větrem se doplní vodorovné prvky (kleštiny) mezi pozednicí a sloupkem. Namáhání všech prvků potom klesne na mez vyhovující normovým požadavkům a rovněž se značně sníží deformace konstrukce.

Bohužel, zachraňovat konkrétně tuto konstrukci je zbytečné a zbývá jenom demolice. Jak ukazují zkušenosti autorů, menší deformace se často dají alespoň částečně sanovat pomocí jednoduchých mechanických prostředků, jako jsou upínací kurty nebo řehťákové zvedáky (hupcuky) a po doplnění dalších prvků, eventuálně zvýšení únosnosti, či sanaci poškozených či poddimenzovaných prvků konstrukce má konstrukce předpoklad pro další život.



Obr. 9: Statické působení krokve s táhlem

## 4 ZÁVĚR

Značná část krovů a to i postavených v nedávné době, vykazuje menší či větší nedostatky. Při striktním posouzení podle současných norem dojdeme velmi často k závěru, že konstrukce jsou poddimenzovány. Přesto fungují dlouhá desetiletí byť i za cenu značných deformací. V těchto konstrukcích však bývá materiál namáhán za mez svojí dovolené únosnosti již při běžném používání. Náhodné přetížení, či oslabení konstrukce např. hnilobou, způsobenou zatékáním, mohou vést až ke kolapsu, zvláště v extrémních zimách.

Správné pochopení statického systému je důležité pro návrh sanace stávající konstrukce i pro vyvarování se chyb při návrhu konstrukce nové. Velmi důležitý je výstižný výpočtový model, který závisí zejména na idealizaci kloubů a zohlednění skutečnosti, že některé tesařské spoje umožní přenesení tahových namáhání buď omezeně, nebo vůbec. Spoje bývají často problematické a je třeba jim věnovat pozornost. Rovněž platí, že nelze činit předčasné závěry kvůli nedostatečné únosnosti prvku konstrukce vyjádřené v řádu procent nebo i desítek procent. Z pochopení statického systému potom plyne způsob sanace, která může být překvapivě jednoduchá a účinná.

## PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek vznikl díky podpoře projektu OP VK OKTAEDR – partnerství a sítě stavebnictví, registrační číslo projektu: CZ.1.07/2.4.00/31.0012.

## LITERATURA

- [1] ČSN 73 17 02, *Navrhování výpočet a posuzování dřevěných stavebních konstrukcí: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Český normalizační institut, 2007.
- [2] EN 1995-1-1: *Navrhování dřevěných konstrukcí, Část 1-1: Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Český normalizační institut, 2006.
- [3] Straka, B., Novotný, M., Krupicová, J., Šmak, M., Šuhajda, K., Vejpusťek, Z., *Konstrukce šikmých střech*. Grada publishing, Praha 2013. ISBN 978-80-247-4205-2.
- [4] Vinař, J., Kufner, V., Horová, I., *Historické krovky*. EL CONSULT, Praha 1995. ISBN 80-902076-0-X.
- [5] DRDÁCKÝ, M., F., Wald, F., Mares, J.: *Modelling of Real Historic Timber Joints*. In Structural Studies - Historical Buildings VI. Southampton: Witpress, 1999. s. 169-178. ISBN 1-85312-690-X.

## Oponentní posudek vypracoval:

Doc. Ing. Jaroslav Sandanus, PhD., Katedra kovových a drevených konstrukcí, Stavební fakulta, STU v Bratislave.

Ing. Mikolášek David, Ph.D., Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-TU Ostrava.